ISSN 0188-5987



CIMENTACIONES EN LA CIUDAD DE MÉXICO: CAMBIOS DE REGLAMENTACIÓN Y PRÁCTICA TRAS LOS SISMOS DE 1985

DANIEL RESÉNDIZ NÚÑEZ

SERIES DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA
ES-9
MAYO 1991

Cimentaciones en la Ciudad de México: Cambios de Reglamentación y Práctica tras los Sismos de 1985

DANIEL RESÉNDIZ NÚÑEZ*

* Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM

ABSTRACT

The 1985 earthquakes in Mexico City led to an extensive research program including a critical review of the local building code and practice of foundation engineering. This paper discusses the main areas where research results gave rise to new code provisions and to changes in design and construction practice. The following topics are discussed: 1) dynamic properties of the subsoil, 2) local amplification, 3) modes of foundation damage and failure, 4) dynamic soil-structure interaction, and 5) seismic behavior of friction piles. For each topic, references are given in which specific information is available.

RESUMEN

Los sismos que afectaron a la ciudad de México en 1985 motivaron un amplio programa de investigación que incluyó la revisión crítica de la práctica y reglamentación del diseño de cimentaciones. En este artículo se exponen los aspectos principales en los que se han generado nuevos conocimientos y, como consecuencia, cambios en las disposiciones reglamentarias y la práctica de la ingeniería de cimentaciones. Los temas que se tratan son: 1) caracterización dinámica del subsuelo, 2) amplificación local, 3) modos de daño y falla de cimentaciones, 4) interacción dinámica suelo-estructura y 5) comportamiento sísmico de pilotes de fricción. En cada caso se dan las referencias que contienen la información detallada.

INTRODUCCIÓN

Pasada la sorpresa que los sismos de septiembre de 1985 causaron por la intensidad de sus efectos en la ciudad de México, la ingeniería civil procuró analizar las evidencias y emprender investigaciones para profundizar en la relación causa-efecto.

Las autoridades capitalinas integraron de inmediato un comité para revisar las normas y procedimientos de construcción relacionados con la seguridad estructural, y las sociedades académicas y profesionales organizaron discusiones para clarificar lo acontecido. La Academia Mexicana de Ingeniería, la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, la *American Society of Civil Engineers*, así como el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en colaboración con la *National Academy of Sciences* de Estados Unidos, propiciaron reuniones técnicas cuyas memorias son fuente de información de primera mano sobre lo ocurrido a las cimentaciones, entre otros aspectos (refs 1 a 4). El Subcomité de Normas y Procedimientos de Construcción (hoy Comité Asesor en Seguridad Estructural del DDF), por su parte, preparó las *Normas de emergencia para diseño y construcción en el Distrito Federal* (ref 5), vigentes de octubre de 1985 al mismo mes de 1987, y el nuevo *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal* (ref 6) que sustituyó a dichas normas y a la versión de 1976 del propio Reglamento; también puso en marcha un programa de investigación que aún opera bajo su orientación y supervisión, con financiamiento tanto del Departamento del Distrito Federal como del CONACYT, en el cual participan, además, Petróleos Mexicanos, Comisión Federal de Electricidad y diversas instituciones de educación superior e investigación.

La información inicial y este programa de reglamentación e investigación han generado nuevos conocimientos que, al difundirse, están produciendo modificaciones en la práctica de la ingeniería civil en la ciudad de México. En este trabajo se revisan los cambios correspondientes a la ingeniería de cimentaciones, tanto los de naturaleza reglamentaria como los

de concepto y procedimiento originados en el aprendizaje empírico y la investigación. Para ello, se evalúa en primer término la práctica previa a los sismos, especialmente sus desviaciones respecto a criterios y procedimientos bien establecidos.

PRÁCTICA PREVIA

Los sismos de 1985 constituyeron una forma de valoración empírica de la ingeniería de cimentaciones practicada durante los años anteriores a ellos. Los resultados principales de tal evaluación pueden expresarse como sigue (ref 7):

1. En la intensidad de las solicitaciones y daños en la ciudad influyeron, además de las peculiaridades del temblor, dos factores: uno geotécnico muy notable, el periodo fundamental del subsuelo en cada sitio, y otro estructural, el periodo fundamental de las edificaciones predominantes en cada zona.

2. De los edificios afectados significativamente, cerca de diez por ciento sufrieron daños en la cimentación que pueden clasificarse como fallas, y lo más frecuente en estos casos fue un hundimiento excesivo, diferencial o generalizado, debido a la deformación del suelo por la combinación de carga sostenida y cíclica.

3. Las cimentaciones que habían sido diseñadas con apego al Reglamento de 1976 y a conocimientos bien establecidos de la mecánica de suelos se comportaron bien, en general, a pesar de haber sufrido solicitaciones muy superiores a las de su diseño.

4. Las cimentaciones con pilotes de fricción sufrieron daños en mayor proporción que las de otros tipos. Inicialmente, este hecho se atribuyó a pérdida de resistencia de los pilotes bajo carga cíclica, pero los análisis posteriores dejaron claro que en todos los casos de este tipo había defectos conceptuales de diseño.

5. La experiencia de los sismos indujo a reanalizar las rutinas de la ingeniería en la ciudad de México desde diversos puntos de vista. De ello se concluyó que, si bien existen una teoría y una práctica bien probadas que permiten hacer diseños y construcción de cimentaciones satisfactorios, diversos factores han contribuido a que la calidad de esta última sea muy heterogénea. Entre las más graves o frecuentes desviaciones de la buena práctica en ingeniería de cimentaciones que se pusieron en evidencia por los sismos cabe apuntar las siguientes:

a) División demasiado tajante de la atención y las responsabilidades de diseño entre estructuristas y geotecnistas, lo que impide identificar y tomar en cuenta los efectos mutuos de cimentación y superestructura.

b) Sesgo de la atención del geotecnista hacia problemas de estabilidad (estados límite de falla) con menosprecio de los de asentamientos y emersiones (estados límite de servicio).

c) Soslayo de heterogeneidades en el perfil del subsuelo, en la historia de sobrecargas del sitio o en la distribución de cargas que pueden producir asentamientos medios o diferenciales excesivos, en los suelos de transicion y lacustre (zonas II y III).

d) Escasa atención a la búsqueda de compatibilidad entre cimentaciones de estructuras colindantes y entre las de diversas porciones de una misma estructura irregular o con varios cuerpos.

e) Menosprecio de las implicaciones peculiares de la consolidación regional en el comportamiento a largo plazo de cada tipo de cimentación, así como de los conflictos que por la misma causa suelen presentarse en el comportamiento de cada cimentación entre el corto y largo plazos y entre las condiciones estática y de sismo. Dos ejemplos: 1) En edificaciones de la zona III con un cuerpo muy alto y otro subterráneo, la solución obvia en ausencia de consolidación regional es apoyar el primero sobre pilotes fijos de punta y dejar el segundo como un cajón con sobrecompensación tal que su expansión a plazos corto y medio sea tolerable. No obstante, la consolidación regional puede hacer que a largo plazo, aunque la porción sobrecompensada tienda a emerger respecto al terreno circundante, sobresalga menos que el cuerpo sobre pilotes de punta; por ello, se tiene que balancear cuidadosamente la magnitud de la sobrecompensación para que la emersión a plazo medio y el asentamiento a largo plazo del cuerpo subterráneo respecto al alto sean aceptables desde los puntos de vista funcional y estructural. 2) En la cimentación por compensación de una estructura de grandes claros con uno o más muros de rigidez*, la solución que primero se ocurre es tomar la concentración de carga

---

* Después de los sismos y con motivo del incremento sustancial de las solicitaciones de diseño especificado por las Normas de Emergencia (1985-1987) y por el nuevo Reglamento de Construcciones de 1987, se ha hecho más frecuente el uso de muros de rigidez como sistema estructural para cargas sísmicas en estructuras ubicadas en las zonas II y III.

sísmica mediante pilotes de fricción concentrados bajo los muros; sin embargo, esto provocaría, debido a la consolidación regional, asentamientos diferenciales bajo condiciones estáticas a largo plazo; por tanto, es mejor recurrir a una fuerte rigidización de la subestructura para redistribuir en ella las cargas sísmicas prescindiendo de pilotes, o bien combinar esta solución con pilotes distribuidos más o menos uniformemente bajo toda la estructura.

f) Hipótesis arbitrarias sobre la distribución de cargas entre losa y pilotes de fricción o de control, en condiciones estáticas y bajo sismo.

g) Uso de procedimientos demasiado simplistas para estimar los asentamientos de cimentaciones con pilotes de fricción.

NUEVOS CONOCIMIENTOS

Aparte de lo revelado por la observación directa del comportamiento de las cimentaciones durante los sismos, que se sintetizó en el apartado anterior, el programa de investigación promovido por el Comité Asesor en Seguridad Estructural del Departamento del Distrito Federal ha generado nuevos conocimientos sobre los siguientes tópicos de la ingeniería de cimentaciones en la ciudad de México:

1. *Caracterización del subsuelo del valle de México desde el punto de vista de sus propiedades dinámicas.* Las propiedades mecánicas del subsuelo de este valle para fines de ingeniería comenzaron a estudiarse sistemáticamente a fines de la década de los cuarenta. Los resultados del amplio programa de investigación que entonces se emprendió están contenidos principalmente en la ref 8, publicada en 1959. Después se realizaron otras numerosas investigaciones (por ejemplo, refs 9 a 13). No obstante, el estudio de las propiedades dinámicas de los suelos apenas había sido tocado puntualmente (refs 14 y 15). El nuevo programa de investigación permitió ampliar los conocimientos prexistentes para cubrir los siguientes aspectos del comportamiento de los suelos arcillosos de la ciudad bajo cargas cíclicas (refs 16 y 17): intervalo de comportamiento casi lineal, magnitud del amortiguamiento intrínseco, leyes esfuerzo-deformación en el intervalo no lineal, correlaciones aproximadas entre parámetros dinámicos y propiedades índice y, como corolario, zonificación del subsuelo lacustre en función de propiedades dinámicas. En ciertos sitios, se extendió la investigación a la llamada capa dura y a los depósitos profundos, cuyas propiedades mecánicas eran

escasamente conocidas a pesar de su importancia como apoyo muy usual de cimentaciones profundas, esto es, pilas y pilotes (ref 18).

2. *Aplicabilidad de diversos modelos matemáticos a la interpretación y predicción de efectos de amplificación local.* Los registros obtenidos del movimiento del terreno durante los sismos de 1985 en estaciones del valle de México con subsuelo de diversa estratigrafía han sido información muy valiosa para probar la aplicabilidad a dicho valle de modelos matemáticos con diverso grado de complejidad. La amplia investigación de las propiedades dinámicas del subsuelo reseñada en el punto anterior dio la información complementaria que se requería para ese fin. De acuerdo con las investigaciones que al respecto se hicieron, parece claro que:

   a) En virtud de la gran extensión horizontal de los depósitos lacustres del valle y de la cuasi linealidad de su comportamiento dinámico hasta niveles de esfuerzo relativamente altos, el modelo unidimensional lineal de propagación de las ondas sísmicas en dichos depósitos predice los efectos locales con mayor fidelidad que en otras condiciones geométricas o en otros suelos, especialmente el periodo fundamental y la máxima amplificación en sitios no muy próximos a las fronteras (ref 19).

   b) Los efectos bidimensionales y tridimensionales tienen importancia en lo acelerogramas de respuesta superficial de los depósitos lacustres principalmente por alargamiento de la duración de las vibraciones superficiales (ref 20).

   c) Los efectos no lineales son importantes solo si los niveles de esfuerzo máximos (sostenido más cíclico) son superiores a más o menos ochenta por ciento de los de falla (ref 16).

3. *Estudio de casos de cimentaciones con daños significativos o fallas.* El análisis detallado de ciertos casos específicos de cimentaciones que sufrieron daño importante durante los sismos de 1985 confirmó, en general, que el factor más importante en tales efectos fue la violación de normas o la desviación de la buena práctica fundada en la experiencia (ref 21).

4. *Importancia de la interacción dinámica suelo-estructura.* Considerar la interacción dinámica suelo-estructura, esto es, el efecto de la deformabilidad del suelo de cimentación en la respuesta sísmica, produce principalmente un alargamiento del periodo

fundamental de vibración de los edificios. El sentido y la magnitud de este efecto en la respuesta estructural es función no solo de la deformabilidad del suelo, sino del periodo fundamental de la misma estructura si estuviese apoyada en base rígida, así como del tipo de cimentación. Se han hecho comparaciones de los efectos típicos de la interacción suelo-estructura en diversas clases de estructuras, cimentaciones y suelos característicos de la ciudad de México (ref 22). Tanto de esos estudios como de otros análisis más generales (ref 23) se infiere que es muy deseable considerar explícitamente este efecto en estructuras de siete a quince niveles ubicadas en la zona III del subsuelo de la ciudad, en vista de que en tales casos la deformabilidad de la cimentación puede incrementar la respuesta estructural a los sismos intensos más frecuentes en la capital de México. También es importante la interacción suelo-estructura en edificios de quince a veinte niveles de la misma zona y en cualquier cimentación desplantada a 3 m o más de profundidad, pues puede repercutir en disminución de la respuesta y consecuente beneficio económico (ref 28). Este último caso es especialmente importante después del considerable incremento de las solicitaciones de diseño sísmico que introdujo el Reglamento de 1987.

En este tema, sin embargo, hay mucho que investigar para mejorar los métodos de análisis actuales, sobre todo en cuanto a los efectos de la interacción suelo-estructura en el amortiguamiento de la respuesta.

Comportamiento de pilotes de fricción bajo carga sísmica. Un número considerable de cimentaciones de este tipo sufrió asentamientos excesivos y, en algunos casos, volteo. En pruebas de campo realizadas en pilotes aislados se observó que la falla se presenta cuando la combinación de carga sostenida más carga cíclica excede la capacidad de carga convencional P_u de los pilotes durante más de diez ciclos. Si la carga total es mayor que 1.2 P_u, la capacidad de carga sostenida después de ello pasa a ser entre 0.5 y 0.8 de la capacidad convencional y la penetración del pilote, de 10 cm o más (ref 24). Los resultados de esta investigación estuvieron disponibles cierto tiempo después de que se emitiera el nuevo Reglamento; por ello, en las NTC* de este se especifica un factor de reducción de resistencia para pilotes de fricción conservador, que quizá proceda modificar en una próxima versión de dichas normas. En efecto, el apartado 3.2 de las NTC especifica que para pilotes de fricción dicho factor debe ser $F_R = 0.7\ (1-s/2)$; siendo s la relación entre los máximos de la solicitación sísmica y la solicitación total

* En adelante la abreviación NTC denotará las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Cimentaciones, asociadas al Reglamento de 1987.

que actúan sobre el pilote. Tal factor reductivo es, por tanto, menor cuanto mayor es la solicitación sísmica en relación con la total, no obstante que –como se dijo– la pérdida de resistencia depende más bien del nivel que alcance la solicitación total, al menos cuando los pilotes no sufren inversión de esfuerzos de compresión a tensión durante la carga cíclica. En consecuencia, procede que el factor de reducción sea constante.

Otros aspectos del comportamiento de pilotes bajo carga cíclica que se averiguaron mediante esta investigación fueron: los efectos de la velocidad de carga en la capacidad de los pilotes cargados monotónicamente en compresión o en tensión, los mismos efectos en el módulo de rigidez bajo carga vertical, las curvas carga-deformación típicas para la gama de deformaciones de interés práctico en compresión, las mismas curvas bajo cargas cíclicas de diverso nivel, y el intervalo de comportamiento cuasi lineal bajo carga cíclica (ref 24).

MODIFICACIONES AL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES

Las partes pertinentes de los conocimientos arriba descritos se incorporaron a la nueva versión del *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, expedida en 1987, o a sus Normas Técnicas Complementarias. En el capítulo sobre cimentaciones de esta nueva versión se hicieron, respecto a la de 1976, modificaciones en los siguientes temas: zonificación, exploración, determinación de propiedades mecánicas del suelo, atención a construcciones colindantes y obras subterráneas, consideración del hundimiento regional, seguridad de cimentaciones, pruebas de carga en pilotes, diseño estructural de la cimentación, excavaciones y muros de contención. En la tabla 1 se da la relación de modificaciones y se compara, para cada uno de los temas indicados, lo que especifican las versiones 1976 y 1987 (el número precedido de la letra R indica el artículo del Reglamento 1987; el precedido de NTC, el apartado de las Normas Técnicas Complementarias de Cimentaciones, 1987).

La mayor parte de las modificaciones se justifica en función de lo discutido antes o del sentido común. En cambio, es pertinente una explicación más amplia de aquellas que las NTC introducen en su apartado 3.5, relativo a diseño de cimentaciones sobre pilotes de fricción.

En la nueva redacción los conceptos básicos de diseño no cambian; sin embargo, se tiene en cuenta el uso inadecuado que de dicho tipo de cimentación se estaba haciendo. Los sismos de 1985 revelaron que, con frecuencia, los pilotes de fricción se diseñaban enfatizando

excesivamente su efecto en la capacidad de carga e ignorando, tanto en ella como en los asentamientos, la compleja interacción pilotes-suelo. Ejemplo de esto es la práctica de sumar indiscriminadamente la capacidad de carga de losa o zapatas a la del conjunto de los pilotes, a pesar de que, en general, la capacidad última del sistema es inferior a dicha suma y más cercana al mayor de ambos componentes, como se verá adelante. Otro ejemplo de práctica inadecuada es suponer que, en cimentaciones compensadas, los pilotes de fricción toman precisamente una carga igual a la diferencia entre el peso del edificio y la compensación; la diferente deformabilidad de pilotes y suelo, así como las deformaciones por consolidación local y regional de este último, hacen que la distribución de cargas entre la cabeza de los pilotes y el terreno de contacto losa-suelo o zapatas-suelo sea no solo más compleja que eso, sino que evolucione con el tiempo. La mecánica del comportamiento de cimentaciones sobre pilotes de fricción desde el punto de vista de sus asentamientos está descrita en las refs 25 y 26 para el caso general de la ciudad de México, teniendo en cuenta los efectos de la consolidación regional. En ambas referencias se proporcionan también métodos para calcular asentamientos en esos casos, y en la ref 27 se presenta un método simplificado para el mismo fin.

Como consecuencia de lo anterior, en las NTC se enfatiza el hecho de que los pilotes de fricción en las condiciones del subsuelo de la zona III de la ciudad de México son esencialmente un complemento a la compensación para reducir la magnitud de los asentamientos. Por ese hecho, las cimentaciones de este tipo no pueden diseñarse sino mediante un análisis expreso de tales asentamientos siguiendo algún método como los indicados en las refs 25 a 27.

Con la excepción de edificios esbeltos, en el diseño de cimentaciones sobre pilotes de fricción no rigen los estados límite de falla, sino los de servicio (asentamientos diferidos). Por otra parte, en vista de que la contribución de los pilotes de fricción a la capacidad de carga de un sitio en la zona III no es muy grande, este tipo de cimentación no es generalmente el más apropiado para edificios altos o esbeltos. En efecto, si se adopta una densidad de pilotes muy alta, de modo que la capacidad de carga del conjunto de estos sea mayor que el peso de la estructura, esta tenderá a emerger y, por tanto, no se puede contar con la trasmisión de carga losa-suelo o zapatas-suelo. En tales condiciones, los pilotes por sí mismos deberían garantizar la estabilidad de la cimentación y por ello, esta opción suele ser antieconómica cuando es viable. Si, por el contrario, la densidad de pilotes es baja y la capacidad de carga del conjunto de estos es menor que el peso del edificio, la estabilidad de la cimentación dependerá esencialmente de la trasmisión de carga losa-suelo de cimentación (fig 1). Los

pilotes contribuirán poco a la resistencia al cortante R_l del segmento L_l de la superficie de deslizamiento, pues fallarán por flexión y no por cortante; esto implica que $R_l \cong c\ L_l$, siendo c la resistencia al corte del suelo. Son estos hechos los que justifican lo especificado en el inciso 3.5.1 de las NTC. Nótese, por otra parte, que no hay contradicción entre la hipótesis $R_l \cong c\ L_l$ y la trasmisión de cargas de la superestructura al suelo simultáneamente por la losa (W_l) y los pilotes (W_2), pues dicha trasmisión solo afecta a las fuerzas internas del cuerpo deslizante.

CONCLUSIÓN

Los efectos de los sismos de 1985 en sí mismos, unidos a la investigación, intensificada después de ellos, acerca de las propiedades dinámicas del subsuelo de la ciudad de México y el comportamiento de las cimentaciones en él, han producido nuevos conocimientos sobre diversos temas de la ingeniería de cimentaciones. Parte de ellos se ha incorporado ya a la versión 1987 del Reglamento de Construcciones para el DF, y otra porción está difundiéndose por diversos medios en la práctica profesional. Las normas y conocimientos recientemente generados están obligando a analizar y diseñar más refinadamente las cimentaciones en la ciudad de México, a la vez que lo hacen posible. Esto, por otra parte, es también un imperativo económico, dado el considerable incremento de solicitaciones para diseño sísmico que la nueva reglamentación impone, especialmente en la zona III. Todo ello está teniendo impacto práctico, principalmente en los siguientes tres aspectos:

1. La corrección de desviaciones de la buena práctica. Esta necesidad es notable en cuanto a establecer firmemente el concepto de que los pilotes de fricción contribuyen sobre todo a reducir asentamientos en cimentaciones con compensación parcial. Ello reduce la gama de problemas en los que este tipo de cimentación es aplicable.

2. La conveniencia de considerar explícitamente en las zonas II y III la interacción dinámica suelo-estructura, a pesar de que el Reglamento la propone solo como opción.

3. La necesidad de que a las subestructuras de muchas edificaciones se les exija más eficacia en su función de redistribuir las cargas, por lo cual dichas subestructuras deben ser más rígidas. Para lograr este propósito, el diseño de las cimentaciones debe basarse en un análisis de la distribución de presiones suelo-cimentación más refinado que el usual.

REFERENCIAS

1. Academia Mexicana de Ingeniería, "Los sismos de 1985", *Alternativas Tecnológicas*, Nº 11, México, DF (nov 1985)

2. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, *Los sismos de 1985: Casos de mecánica de suelos*, México, DF (sep 1986), 474

3. American Society of Civil Engineers, *The Mexico earthquakes 1985: Factors involved and lessons learned*, M A Cassaro y E Martínez-Romero, eds, Nueva York (1987)

4. National Science Foundation-CONACYT, *First, second and third US-Mexico workshops on 1985 Mexico earthquake research,* México, DF (1986, 1987 y 1989)

5. Departamento del Distrito Federal, *Normas de emergencia para aplicar el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, México, DF (oct 1985)

6. Departamento del Distrito Federal, *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, México, DF (oct 1987)

7. Reséndiz, D, "El sismo del 19 de septiembre 1985 en la ciudad de México: aspectos geotécnicos y de cimentaciones", *Alternativas Tecnológicas*, Nº 11, Academia Mexicana de Ingeniería (1987), 117-143

8. Marsal, R J y Mazari, M, *El subsuelo de la ciudad de México*, Instituto de Ingeniería, UNAM, 2 vols (1959)

9. Secretaría de Hacienda y Crédito Público, *Nabor Carrillo, el hundimiento de la ciudad de México y el Proyecto Texcoco*, México, DF (1969), 328

10. Reséndiz, D *et al*, "Información reciente sobre el subsuelo y la práctica de la ingeniería de cimentaciones en la ciudad de México", *Memorias de la V Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, vol 1, México, DF (1970), IV-1 a IV-59

11. Alberro, J, *Resistencia a largo plazo de la arcilla de la ciudad de México*, Series del Instituto de Ingeniería, N° 317, México, DF (ago 1973)

12. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, *El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del valle de México*, México, DF (mar 1978)

13. Rascón, O, *Espectros de temblores en el valle de México considerando la viscosidad del suelo*, Facultad de Ingeniería, UNAM, tesis de maestría, México, DF (1964)

14. Reséndiz, D, Nieto, J A y Figueroa, J, "The elastic properties of saturated clays from field and laboratory measurements", *Proceedings, III Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol I, Caracas, Venezuela (1967), 443-466

15. Zeevaert, L, "Free vibration tests to determine the shear modulus of elasticity of soils", *Proceedings, III Panamerican Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering*, vol I, Caracas, Venezuela (1967), 111

16. Jaime, A, *Características dinámicas de la arcilla del valle de México*, Facultad de Ingeniería, UNAM, tesis doctoral, México, DF (1987)

17. Jaime, A, Reséndiz, D y Romo, M P, "El subsuelo de la ciudad de México: propiedades dinámicas y zonificación", *Ingeniería*, vol 58, N° 2, México, DF (jun 1988), 5-25

18. Ovando, E, Mendoza, M J y Romo, M P, "Deformability of Mexico City hard deposits under cyclic loading", *Earthquake Spectra*, vol 4, N° 4 (nov 1988), 753-770

19. Seed, H B *et al*, "The Mexico earthquake of September 19, 1985: relationships between soil conditions and earthquake ground motions", *Earthquake Spectra*, vol 4, N° 4 (nov 1988), 687-729

20. Bard, P Y *et al*, "A theoretical investigation of large and small scale amplification effects in the Mexico City Valley", *Earthquake Spectra*, vol 4, N° 3 (ago 1988), 609-633

21. Mendoza, M J y Auvinet, G, "Behavior of building foundations in Mexico City", *Earthquake Spectra*, vol. 4, N° 4 (nov 1988), 835-853

22. García-Ranz, F, Gómez, R y Reséndiz, D, "Respuesta sísmica de edificios considerando la interacción suelo-estructura", *Ingeniería*, vol 59, N° 1 (mar 1989), 18-30

23. Reséndiz, D y Roesset, J M, "Soil-structure interaction in Mexico City during the 1985 earthquakes", *The Mexico earthquakes 1985*, American Society of Civil Engineers, M A Cassaro y E Martínez-Romero, eds (sep 1986), 193-203

24. Jaime, A, Romo, M P y Reséndiz, D, *Comportamiento de pilotes de fricción en arcilla del valle de México*, Series del Instituto de Ingeniería, N° 515, México, DF (nov 1988), 137

25. Reséndiz, D y Auvinet, G, "Analysis of pile foundations in consolidating soil", *Proceedings, VIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol 2, part 1, Moscú (1973), 211-218

26. Zeevaert, L, *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*, Van Nostrand Reinhold Co, Nueva York (1972)

27. León, J L y Reséndiz, D, *Cálculo de asentamientos de cimentaciones sobre pilotes de fricción*, Series del Instituto de Ingeniería, N° 420, México, DF (1979)

28. Romo, M P, *Interacción dinámica suelo-estructura en la ciudad de México*, conferencia de ingreso, Academia Mexicana de Ingeniería, México, DF (1991)

TABLA 1. NUEVAS DISPOSICIONES DEL CAPÍTULO DE CIMENTACIONES DEL REGLAMENTO 1987 Y SUS NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS

Tema y ubicación	Reglamento 1976	Reglamento 1987
Zonificación R 219, NTC 2.1	- Zonificación de cada sitio mediante estudio geotécnico - Definición de tres zonas geotécnicas en función de la profundidad de los depósitos poco compresibles	- Zonificación mediante mapa o estudio geotécnico. En caso de contradicción prevalece el segundo - Definición de tres zonas geotécnicas en función de espesores compresibles y otras características - Cerca de las fronteras entre zonas, adopción de la opción más desfavorable
Exploración R 220, NTC 2.2	- Para presiones de contacto y profundidades de desplante pequeñas puede omitirse exploración - En caso de exploración, tres grupos de requisitos mínimos por zona, en función de cargas medias y profundidad de desplante - Requisitos de exploración uniformes en cada zona - Profundidad mínima de exploración medida a partir de la superficie	- Para presiones de contacto y profundidades de desplante pequeñas, pueden omitirse sondeos, pero no inspección y exploración somera - Dos grupos de requisitos mínimos de exploración por zona, en función de cargas medias, profundidad de excavaciones y extensión de planta - Requisitos de exploración en zona I distintos para suelos volcánicos y roca basáltica - Profundidad mínima de exploración medida a partir de la profundidad de desplante
Determinación de propiedades geotécnicas R 220, NTC 2.3	- Enumera propiedades de interés y métodos para determinarlas - Número mínimo de determinaciones: una cada cuatro metros en estratos uniformes; una de *w* por *m* de sondeo - No se exigen propiedades dinámicas	- Exige determinación de propiedades que se requieran para diseño de cimentación y excavaciones. Especifica determinarlas con procedimientos aceptados - Número mínimo de determinaciones: dos por estrato identificable; tres de *w* por *m* de sondeo en zona III - Pide determinar propiedades mecánicas estáticas y *dinámicas*
Construcciones colindantes y obras subterráneas R 221	Solo demanda investigar construcciones colindantes	- Solicita investigar también obras subterráneas próximas existentes y planes de futuras

Tema y ubicación	Reglamento 1976	Reglamento 1987
Hundimiento regional R 222, NTC 2.4	- Pide investigación directa o mediante datos de la CAVM	- Requiere se considere evolución futura y prever efectos a corto y largo plazos en edificaciones de grupos A y B_1 mediante observaciones directas
Seguridad de cimentaciones (general) R 223-226, NTC 3.1 y 3.2	- Para *acciones de diseño* remite a otro capítulo. No señala explícitamente fricción negativa como acción de diseño. Ignora la aceleración de la masa de suelo deslizante - No se especifica F_c para fricción negativa y otras acciones - Los F_R se llaman *factores de reducción de la capacidad de carga* Posibilidad de confusión con $(FS)^{-1}$ - Especifica F_R=0.7 para pilotes de fricción - Límite máximo de asentamiento o emersión igual para construcciones aisladas y colindantes - Ignora periodos dominantes del terreno e interacción dinámica suelo-estructura	- Señala explícitamente *acciones de diseño y sus combinaciones*, incluyendo, entre otras, fricción negativa y aceleración de la masa de suelo deslizante. Enfatiza considerar excentricidades estáticas y volteo dinámico - Se especifica F_c =1.1 para fricción negativa y otras acciones originadas en la cimentación - Los F_R se llaman *factores de resistencia relativos a la capacidad de carga* - Especifica F_R=0.7 (1-s/2) para pilotes de fricción - Límite máximo de asentamiento o emersión para construcciones aisladas mayor que para colindantes - Permite tomar en cuenta periodos dominantes del terreno e interacción dinámica suelo-estructura, y da métodos para ello (capítulo de diseño sísmico)
Cimentaciones someras NTC 3.3	- Contra falla local en suelos pobres se reduce c y ϕ - Especifica método para analizar falla por extrusión de estratos blandos confinados - Especifica método para verificar capacidad de carga bajo carga excéntrica en la dirección corta - Criterios y métodos para cálculos de estabilidad y asentamientos, entremezclados. Ayudas de diseño para algunos métodos - Ignora deformaciones bajo cargas accidentales	- Solo se reduce ϕ contra falla local en suelos granulares con D_r<70 % - Exige verificar todo mecanismo de falla compatible con el perfil estratigráfico, pero no se especifican mecanismos ni métodos - Especifica método para verificar capacidad de carga bajo cargas excéntricas en direcciones trasversal y longitudinal - Separa especificaciones para verificación de estados límite de falla y de servicio. Omite ayudas de diseño - Pide determinar deformaciones transitorias y permanentes bajo carga sísmica

Tema y ubicación	Reglamento 1976	Reglamento 1987
Cimentaciones compensadas NTC 3.4	- Ignora movimientos transitorios	- Especifica determinación de deformaciones verticales y de giro, transitorias y permanentes, bajo acciones sísmicas - Especifica considerar subpresión solo si se usa el cajón - Enfatiza revisión de falla local o general bajo combinaciones de carga que incluyen sismo - Permite tomar fuerzas laterales mediante empuje pasivo con F_R=0.35
Cimentaciones sobre pilotes de fricción NTC 3.5	- Define los PF en función del valor relativo de sus capacidades de carga por fricción y por punta - Para calcular capacidad por fricción permite estimar *c* con pruebas q_u o *UU* - Ignora deformaciones bajo cargas accidentales. Solo considera movimientos verticales - Acepta sumar capacidades de carga de losa (o zapatas) y pilotes *cuando sea compatible con las condiciones de trabajo de la cimentación* - Desprecia la capacidad de punta de los PF	- Define los PF como complemento de cimentaciones parcialmente compensadas - Para calcular capacidad por fricción especifica estimar *c* con prueba *UU* - Especifica considerar movimientos transitorios horizontales y de giro, y movimientos verticales y de giro permanentes bajo carga que incluya sismo - Adopta como capacidad de carga *la mayor*, considerando los valores de: a) la del sistema losa-suelo o zapata-suelo ignorando pilotes, o bien, b) la del sistema pilotes-suelo - Considera la capacidad de punta de los PF - Desprecia la capacidad de carga de pilotes sometidos a tensión, salvo diseño *ex profeso*
Cimentaciones sobre pilotes de punta o pilas NTC 3.6	- Ignora efectos de escala en cálculo de capacidad de punta - Ignora deformaciones bajo cargas accidentales	- Introduce corrección empírica para efecto de escala en capacidad de carga de elementos con D>50 cm - Especifica considerar movimientos transitorios horizontales y de giro bajo carga sísmica - Especifica ignorar efecto de losa o zapatas en capacidad de carga - Especifica verificar capacidad del suelo para soportar los esfuerzos horizontales de los pilotes bajo carga sísmica

Tema y ubicación	Reglamento 1976	Reglamento 1987
Pruebas de carga en pilotes NTC 3.7	- Precisa cómo interpretar resultados de *n* pruebas	- Precisa en qué casos verificar estimaciones analíticas con pruebas de carga (edificaciones de grupos A o B_1 con grandes incertidumbres en propiedades de los suelos)
Diseño estructural de la cimentación R 227, NTC 4	- Solo considera aspectos relacionados con distribución de presiones verticales de contacto subestructura-suelo	- Especifica calcular presiones verticales y horizontales de contacto bajo cada combinación de acciones de diseño - Señala requisitos para diseño estructural de pilotes bajo acciones verticales y horizontales
Excavaciones R 228, NTC 5	- Especifica sobrecarga mínima de 1.5 t/m^2 con F_c= 1.0 en excavaciones ademadas - No indica criterios para revisar estados límite de diseño	- Define F_c =1.1 y agrega peso de equipo de construcción, tráfico, etc - Da criterios para revisión sistemática de estados límite de falla y servicio separadamente - Incluye falla por inestabilidad del fondo por flujo de agua - Incluye asentamientos y movimientos horizontales por cedencia de ademes
Muros de contención R 229, NTC 6		- Amplía y especifica más explícitamente estados límite de falla y servicio, requisitos para rellenos, y condiciones para empuje activo y de reposo
Procedimientos de construcción R 230, NTC 7	- Tratamiento escueto y solo en Reglamento	- Introduce en NTC lineamientos para ejecutar: • hinca de pilotes • colado *in situ* de pilotes o pilas • pruebas de carga en pilotes • excavaciones • control de flujo de agua • tablestacas • muros colados *in situ*

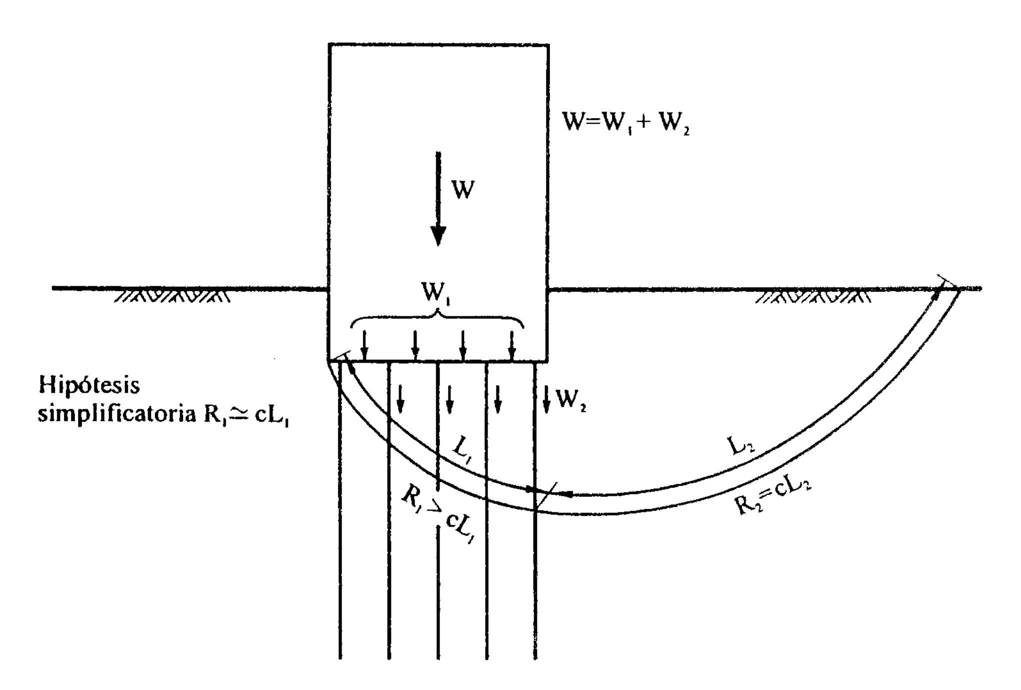


Fig 1. Contribución de pilotes de fricción con baja densidad a la capacidad de carga